

HID 램프용 공진형 전자식 안정기

Resonant-type Electronic Ballast for HID Lamp

李 成 熙* · 李 治 煥** · 權 宇 鉉***

(Seung-Hee Lee · Chi-Hwan Lee · Woo-Hyen Kwon)

Abstract - A resonant-type electronic ballast for a metal halide discharge(MHD) lamp is proposed and implemented for 400W MHD lamp. HID lamps have good color rendition, long life and good focusing capability but they have flickers by acoustic resonance when driven at high frequency. A new control method is employed to remove acoustic resonance related instability in HID lamp. By using the amplitude modulation, a spread spectrum effect is employed on the ballast. The control loop of resonant inverter is analyzed and a current controller is designed. The ballast consists of a power factor controller, an half-bridge resonant inverter, a simple ignitor and an integrator with OP-amps. The experimental results show the good performance as PF 0.93, ballast loss 22W at output 400W and the conducted EMI level is below 60dBuV.

Key Words : electronic ballast, HID lamp, resonant inverter, acoustic resonance

1. 서 론

고압방전등(HID)은 고효율의 광원으로 점등장치인 안정기와 함께 많은 연구가 수행되고 있다. Metal halide discharge(MHD) 램프는 수은, 알콘 가스 외에 금속 할로겐 화물이 봉입되어 광효율 상승과 연색성, 수명 등이 우수하다. 또한 방전관이 작아 점광원이 되어 조명제어가 용이하다. 일반적으로 사용되는 코일식 안정기는 부피, 무게, 설치 제약조건 등의 단점을 보완할 필요가 있다. 이에 반하여 고주파 구동 전자식 안정기는 효율 향상, 수명 연장, 램프 전력 제어성 용이, 안정기의 부피 및 무게 감소 등의 장점을 가지는데, 음향 공진 발생이 주요 문제점으로 인식된다.[1]-[8]. HID 램프의 불안정으로 인한 음향 공명을 피하기 위한 적절한 주파수 범위 설정이나 램프 상태 변화에 따른 음향공진 방지 방법 등이 전자식 안정기 설계자의 주요 관심사가 되어왔다.[2] HID 램프의 음향 공명은 램프의 구조, 내부가스 등에 따라 고유 진동 주파수가 결정되고 온도 변화 등의 램프 상태 변화에 의해 변화한다. MHD 램프는 다른 램프에 비하여 물리적 구조 특성상 음향 공명 주파수 대역이 넓게 분포되어 있다.[3]

HID 램프에서 음향 공명의 해결방법은 100kHz 이상에서 구동하거나, 120Hz 구형파에 고주파를 혼합하는 방법 또는 주파수

변조, 위상변조 등을 이용하여 스위칭 패턴을 변화시켜 스펙트럼을 확산시킨다.[1]-[4]. 일반적 전자식 안정기는 25kHz-35kHz 주파수 대역에서 음향 공명을 벗어나는 것으로 보고되고 있다.[5][6] 스위칭 패턴 변동을 통한 스펙트럼 확산 방법은 구동 주파수를 직접 제어하므로 공진 주파수 변동에 대한 전류제어가 어렵고, 고주파 혼합 120Hz 구형파 구동은 고주파 스위치 2개 및 저주파 스위치 2개 등 4개의 전력소자를 요구하며 변환효율이 낮아진다. 또한 100kHz 이상의 구동은 EMI 문제를 일으키며 스위칭 손실 및 자기코어 손실 등이 높아진다.[1][8]. 최근에 확인된 진폭변조 부가에 의한 스펙트럼 확산 방법은 구동 주파수 제어가 필요 없으며, EMI 문제를 해결할 수 있다.[8]

전자식 안정기의 공진 인버터 회로설계는 MHD 램프의 고주파 등가저항과 전원전압 및 공진 특성곡선을 이용하여 이루어진다.[6] 램프전력은 동작주파수의 변화로 제어되지만 주파수 변화에 따른 출력특성은 비선형으로 나타나므로 제어기 설계에 필요한 전달함수를 얻기가 힘들다. 자력식 공진회로는 공진회로의 변화 및 램프 특성 변화에 대한 전력 제어가 불가능하다.[5][6]

본 연구에서는 400W MHD 램프를 구동하기 위한 공진형 전자식 안정기를 설계, 제작하였다. 반파 브리지로 공진 회로를 구성하고 전원 입력에 PFC를 사용하여 역율을 개선하고, 전원 전류 고조파를 감소시켰다. 램프 시동전압은 램프와 병렬로 연결된 보조 콘덴서에서 얻어지고 방전개시 후 구동주파수로 전환 되도록 하였다. 음향공명 제거를 위해 전류 제어기에 120Hz 설동을 부가하여 램프 전류의 스펙트럼을 확산시키며 램프전압을 검출하여 램프전력을 제어하였다.

연산증폭기로 구성된 선형제어기와 FET 소자로 제작된 400W MHD 램프 전자식 안정기는 안정기 손실 22W, PF 0.93, A_{TED} 14% 및 EMI 레벨 60dbuV 이하를 달성하였다.

* 正 會 員 : 浦港産業科學研究元 前任研究員 · 碩士

** 正 會 員 : 威德大 工大 電子工學科 助教授 · 工學博士

*** 終身會員 : 慶北大 工大 電子電氣工學部 教授 · 工學博士

接受日字 : 2001年 6月 1日

最終完了 : 2001年 8月 29日

2. 이 론

2.1 전류 제어기

반파 브리지 직렬 공진 인버터를 이용한 전자식 안정기는 그림 1과 같이 구성된다.

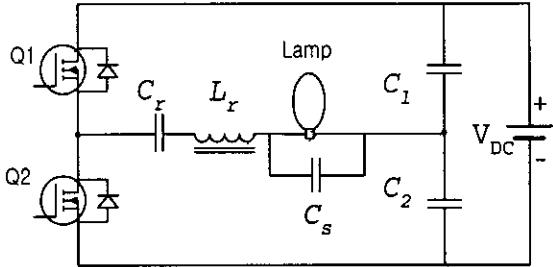


그림 1. MHD 램프용 전자식 안정기의 구성
Fig. 1. Configuration of electronic ballast for MHD lamps.

기본 공진 주파수는 Cr과 Lr에 의해 결정된다. 커패시터 Cs는 Cr에 비해 매우 작은 용량이며, MHD 램프의 점등은 커패시터 Cs를 이용하여 직렬 공진 주파수 $1/(2\pi\sqrt{L_r C_s})$ 구동에서 얻어지는 약 1kV의 전압으로 시작된다. 고주파로 구동되는 MHD 램프는 전압과 전류가 동상으로 나타나는 순수 저항성을 갖는다. 그림 2에 일반적 MHD 램프의 점등특성을 나타내었다. 초기 전압은 매우 낮으며, 초기전류는 전극의 스퍼터링에 의한 소손 방지와 시동 시간 단축을 위해 정격전류의 120%를 공급한다. 공진회로의 전류 특성은 부하저항에 따라 그림 2와 같이 나타난다. 그러므로 MHD 램프의 특성변화는 공진회로 부하저항의 변화로 취급되고 그림2에서, 전압 전류비로부터 정상 상태의 20%이하까지 낮아지는 최소 저항 R_{min} 과 정상상태 저항 R_{max} 값을 구한다.

$$R = [R_{min} \quad R_{max}] \quad (1)$$

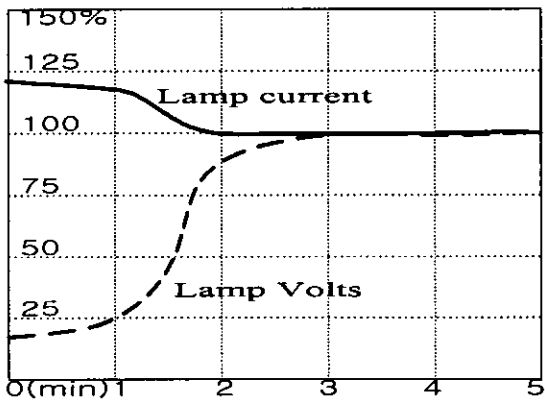


그림 2. MHD 램프의 대표적 시동특성
Fig. 2. Typical starting characteristics of MHD lamps.

공진 인가 전압은 전폭 $V_{DC}/2$ 를 가지는 구형파 전압의 푸리에 전개로부터 다음과 같이 구해진다.[9]

$$v_f = \frac{2V_{DC}}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots) \quad (2)$$

직렬 공진회로의 임피던스를 얻고 인가 전압의 기본파만 고려하면 램프 전류 실효치는 다음으로 표현된다.

$$I_r = \frac{\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 \sqrt{(R/Z_0)^2 + (\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2}} \quad (3)$$

여기서 $Z_0 = \sqrt{L_r/C_r}$, $\omega_0 = 1/\sqrt{L_r C_r}$ 이다. 초기 시동시 램프는 R_{min} 상태이며, 정격전류 I_n 의 1.2배가 공급되어야 하므로 초기 구동 주파수 ω_2 에서의 램프 전류는 다음으로 된다.

$$I_2 = 1.2I_n = \frac{\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 \sqrt{(R_{min}/Z_0)^2 + (\omega_2/\omega_0 - \omega_0/\omega_2)^2}} \quad (4)$$

정상상태 등가 램프저항은 R_{max} 이며 이때의 램프 전류는 정격 전류 I_n 이다.

$$I_1 = I_n = \frac{\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 \sqrt{(R_{max}/Z_0)^2 + (\omega_1/\omega_0 - \omega_0/\omega_1)^2}} \quad (5)$$

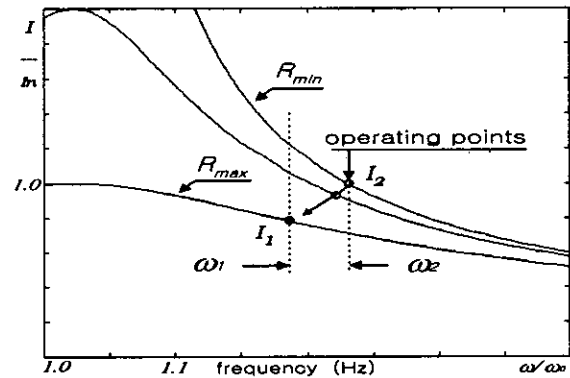


그림 3. 직렬 공진 인버터의 특성곡선
Fig. 3. Characteristic curves of a series resonant inverter.

주어진 조건값 V_{DC} , Z_0 , R_{max} , I_n 와 식(7)에서 ω_1/ω_0 비를 식(6)으로 구할 수 있고 정상상태 구동주파수 ω_1 도 구하여진다.

$$\frac{\omega_1}{\omega_0} = \frac{Q_1 + \sqrt{Q_1^2 + 4}}{2} \quad (6)$$

$$Q_1 = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 I_n}\right)^2 - \left(\frac{R_{max}}{Z_0}\right)^2} \quad (7)$$

점등초기 상태에서 전류는 $1.2I_n$ 이므로 식(8)을 이용하여 식(10)에서 ω_2 를 얻는다.

$$1.2I_n = \frac{\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 \sqrt{(R_{min}/Z_0)^2 + (\omega_2/\omega_0 - \omega_0/\omega_2)^2}} \quad (8)$$

$$\approx \frac{\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 (\omega_2/\omega_0 - \omega_0/\omega_2)}, \quad R_{min} \ll Z_0$$

$$Q_2 = \frac{\sqrt{2} V_{dc} \omega_0}{1.2 \pi Z_0 I_n}, \quad \omega_2 > \omega_1 \quad (9)$$

$$\omega_2 = \frac{Q_2 + \sqrt{Q_2^2 + 4\omega_0^2}}{2} \quad (10)$$

동작점 부근의 주파수 변화에 대한 공진전류의 변동은 선형함수로 모델링 할 수 있다. MHD 램프 전자식 안정기는 공진점 ω_0 보다 높은 주파수에서 동작되므로 상수 $-K_{INV}$ 로 인버터의 특성을 표현된다.

$$\frac{\Delta I}{\Delta \omega} = \frac{I(\omega_1) - I(\omega_2)}{\omega_1 - \omega_2} = -K_{INV} \quad (11)$$

인버터의 구동펄스는 V/F 변환기에서 공급되며 입력전압 v에 대한 인버터 출력전류 I_r 의 전달함수는 다음으로 주어진다.

$$I_r = (-K_{INV} \cdot K_v) v + I_o = -K_r v + I_o \quad (12)$$

여기서 I_o 는 오프셋 전류 값을 나타낸다. 일반적으로 램프전류는 검출 후 정류하여 직류로 변환하며 시정수 T_f 인 LPF(low pass filter)를 통하여 제어기에 공급된다. 그림 4는 주파수 제어 직렬 공진 인버터의 모델 블록도이다. 계수 $-K_r$ 은 V/F 변환기 입력 v에 대한 출력전류 변화율을 나타낸다.

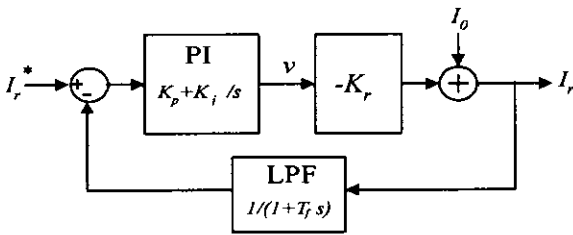


그림 4. 전자식 안정기의 모델 블록도
Fig. 4. The block diagram of model for electronic ballast

전체 시스템의 전달함수는 다음으로 표현된다.

$$\frac{I_r(s)}{I_r^*(s)} = \frac{K_r(K_p T_f s^2 + (K_i T_f + K_p)s + K_i)}{T_f s^2 + (1 + K_r K_p)s + K_r K_i} \quad (13)$$

그리고 시스템의 극점은 다음과 같다.

$$p1, p2 = -\frac{K_r K_p + 1}{2T_f} \pm \sqrt{\left(\frac{K_r K_p + 1}{2T_f}\right)^2 - \frac{K_r K_i}{T_f}} \quad (14)$$

안정한 시스템의 동작을 확보하기 위해서는 LPF보다 좁은 시스템 대역폭을 가져야 하므로 식(14)에서 $K_p=0$ 으로 두면 시스템 극점의 실수부는 LPF 대역의 1/2이 된다. 이때의 극점과 영점은 다음으로 주어진다.

$$p1, p2 = -\frac{1}{2T_f} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2T_f}\right)^2 - \frac{K_r K_i}{T_f}} \quad (15)$$

$$z1 = -\frac{1}{T_f}$$

시간 응답의 속응성을 위해 약간의 오버슈트를 가지도록 극점을 배치해야 하므로 식(15)에서 적분상수 K_i 를 결정 할 수 있다. 결국 MHD 램프 전자식 안정기의 제어기는 적분제어기로 얻어진다.[10]

$$K_i > \frac{1}{4T_f K_r}, \quad K_p = 0 \quad (16)$$

2.2 음향 공명 제거

HID 램프란 고압수은 램프, HPS(high pressure sodium) 램프, MHD 램프 등을 말하며 이들은 방전관에서 방전이 일어날 때, 음향이 발생된다. 이 때, 음향 진동수와 램프 점등 주파수가 일치되면 공명 현상으로 방전관내의 에너지 분포가 불균등하게 되고 압력변화가 심해져 전극간의 아크 방전 형태가 휘어진 모양으로 되므로 빛의 흔들림(flicker)과 전압 상승, 아크 소멸 등의 현상이 발생된다. 이러한 현상을 음향 공명이라 한다. 고압 나트륨 램프와 같이 방전관이 가늘고 긴 경우는 하나의 기본주파수로 이루어지므로 그림 5와 같이 불안정 영역이 규칙적으로 존재하지만, MHD 램프, 고압수은 램프와 같이 타원 형상일 경우 방전관의 길이 방향인 l_1 방향, 방전관의 반지름에 해당하는 l_2 방향과 방전관의 원 방향에 해당하는 l_3 방향의 영향으로 복수개의 기본주파수가 존재하여 불안정 영역이 그림 6과 같이 확대된다.

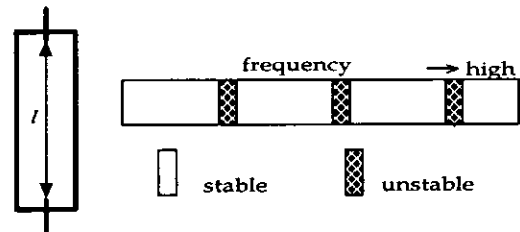


그림 5. HPS 램프의 형상과 음향공명 영역
Fig. 5. Shape of HPS lamp and bands of acoustic resonance.

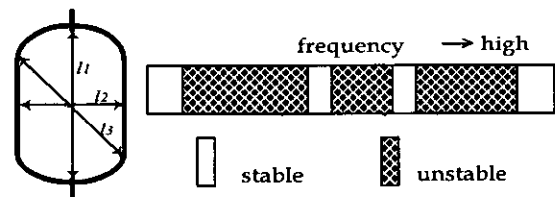


그림 6. MHD 램프의 형상과 음향공명 영역
Fig. 6. Shape of MHD lamp and bands of acoustic resonance.

MHD 램프에서 나타나는 기본 공진 주파수는 다음과 같다.

$$f_1 = \frac{C}{2L}, \quad f_2 = \frac{3.83C}{2\pi R}, \quad f_3 = \frac{1.84C}{2\pi R} \quad (17)$$

여기서 C는 방전관내의 음향 속도이며 크기는 560[m/sec]이고, L은 방전 아크의 길이이며, f_1 , f_2 및 f_3 는 길이방향, 지름방향 및 원방향 기본 공명 주파수이다.[7]. 음향공명을 일으키는 공명주파수 f_{ar} 은 다음과 같다.

$$f_{ar} = \begin{cases} l f_1 \\ m f_2 \\ n f_3 \end{cases} \quad (18)$$

여기서 l, m 및 n은 1, 2, ..., 정수이다.

일반적으로 공진 인버터에 의해 구성되는 안정기는 구동주파수가 공진 주파수 보다 높게 설정되므로, 램프전류는 기본주파수 외에 다수의 고조파가 포함된 삼각파 모양이다. 삼각파 전류는 기본파 외에 많은 고조파를 가지고 있으므로 방전관에서 소리를 발생시키지는 않지만 아크의 불안정이 관측된다. 스펙트럼 확산에 의한 음향공명 감소는 그림 7과 같이 전류제어기의 입력에 정현파를 중첩시켜 이루어진다.

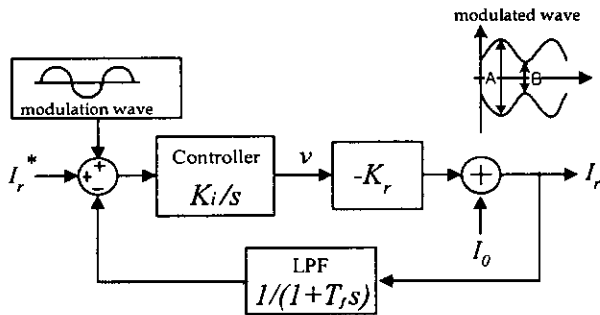


그림 7. 진폭변조가 포함된 전류제어기
Fig. 7. Current controller with amplitude modulation.

변조신호로 구형파, 삼각파 등을 채용할 수도 있으나 고조파의 영향으로 소음이 발생하므로 낮은 주파수의 정현파를 선택한다. 변조파의 주파수는 시스템의 대역폭보다 낮게 선택하며 램프전류 I_r 은 전류제어기에 의해 지령치 I_r^* 에 정현파가 중첩된 파형으로 나타난다. 이 때, 변조도 m은 다음과 같다.

$$m = \frac{(A-B)}{(A+B)} \times 100\% \quad (19)$$

변조도 m의 진폭 변조에 의한 스펙트럼 확산 대역은 램프 전류를 구하는 식 (11)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta\omega_m = \left| \frac{1}{K_{INV}} \Delta I \right| = \left| \frac{m}{K_{INV}} I_r^* \right| \quad (20)$$

출력 전류는 진폭변조 되므로 변조파와 동일한 주기의 전력변

화가 나타나고, 동시에 캐리어의 주파수가 변화하여 스펙트럼 확산 효과가 발생한다. 식 (20)에서, 전류 명령치 I_r^* 은 시동초기에 1.2 I_n 이고 정상상태에서는 I_n 으로 감소하므로 시동초기에 보다 넓은 스펙트럼 확산을 가진다. 스펙트럼 확산, 위상변조, 구형파 구동, 3고조파 중첩 등의 음향 공명 감소 방법은 부가적 제어기가 요구되지만, 전류제어기에 의한 진폭 변조 방법은 전류제어기에 저주파 변조 신호의 추가로 이루어지므로 구성이 단순하며 변조도의 변경으로 쉽게 음향공명을 제거할 수 있다. 음향공명 현상인 아크 불안정은 방전관에서 쉽게 관측되므로 음향 공명이 제거되는 임계 변조도를 실험으로 구할 수 있다.

3. 실험

400W MHD 램프를 구동하기 위해 그림 8과 같은 회로가 설계되었고, 그림 9와 같은 장치를 제작하였다. PFC 제어기는 KA7526을 사용하고 IRFP460으로 스위칭하여 직류 350V를 얻고 IRFP450으로 반파 브리지 공진 인버터를 구성한다. Lr 220uH, Cr 0.22uF, Cs 0.01uF, Tf 1ms, Kr 0.048, Kf 6000 및 350V 직류를 적용하였다. 초기 1kV 시동전압은 램프 병렬 Cs에 의해 얻어지며 구동주파수는 35kHz 부근으로 선택하였다. 램프 전류 제어는 연산 증폭기를 이용한 아날로그 제어기로 구성되었으며, 변조도 m의 변화는 변조파 입력 주파수와 진폭으로 조정된다. 제어기의 출력 전압은 VCO를 통하여 주파수로 변환되어 반파 브리지의 공진 인버터를 구동한다. 표 1에서, 변조도(Mod. index) 20% 조건으로 운전시 음향공명이 제거되었고, 상용 교류 전압 V_{rms} 6%에서 전류 A_{rms} 14%를 얻었다. 역율 0.93이 얻어졌다. 안정기 손실 22W에 비해 기존 기계식 안정기는 45W 손실을 가진다. 음향공명을 제거하기 위해 램프 전류제어기의 입력에 120Hz 정현파 섭동을 인가하여 전류 스펙트럼을 확산시키며 그림 10에서 램프전류의 스펙트럼을 확인할 수 있다. 섭동이 없는 경우 구동주파수는 33.5kHz 단일 대역이며 스펙트럼 확산이 있는 경우 약 5kHz 확산 대역에서 음향공명이 제거되었다. 5kHz 확산 대역은 60Hz 정류 전압에서 나타나는 120Hz 주파수의 맥동을 전류 명령값에 부가함으로써 VCO의 인버터 스위칭 주파수가 변화하도록 함으로써 획득되었다. 램프 제조사와 램프 상태에 따라 약간의 차이를 보였다. 그림 11은 안정기에서 방출되는 전도성 EMI를 측정된 것이다. 주어진 대역내에서 57dBuV의 첨두치를 나타내었다.

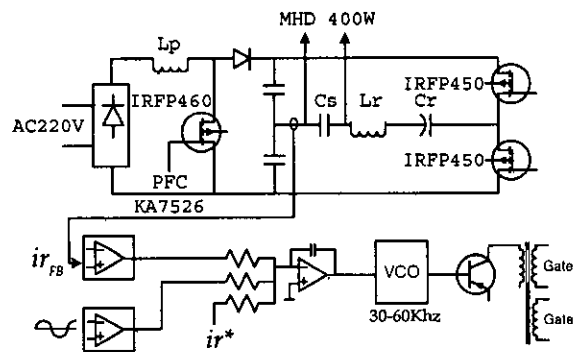


그림 8. MHD 램프용 안정기 구성
Fig. 8. Circuit of ballast for MHD lamp.

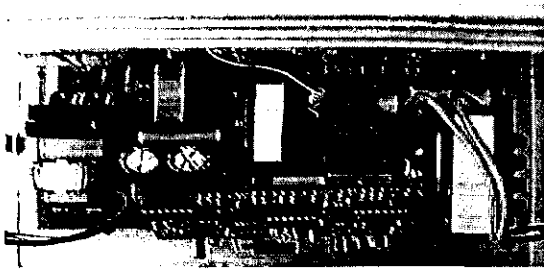
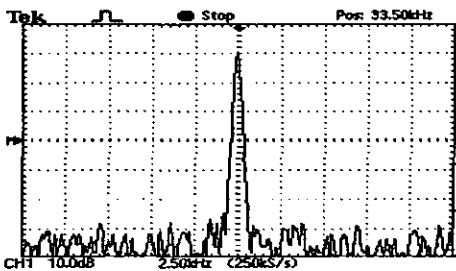


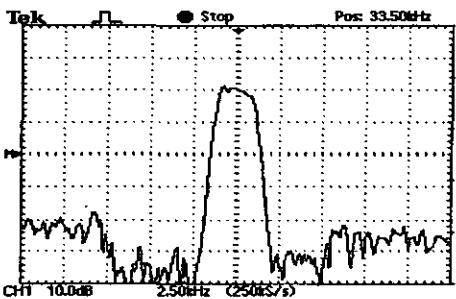
그림 9. 구현된 MHD 램프용 안정기 사진
Fig. 9. Picture of ballast for MHD lamp.

표 1. 제작된 전자식 안정기의 전기적 특성
Table 1. Electrical characteristics of the prototype ballast.

	Electronic Ballast	Coil Ballast
Input power	422 W	445 W
Output	400 W	400 W
Power factor	0.93	0.86
A_{THD}	14 %	215 %
Mod. index	20 %	



a) without spread spectrum



b) with spread spectrum

그림 10. 램프 전류 스펙트럼
Fig. 10. Spectrums of the lamp.

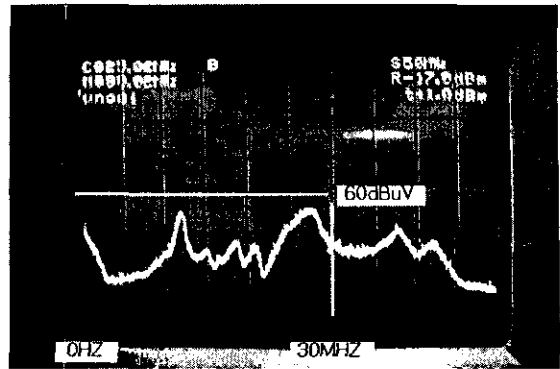


그림 11. 전도성 EMI level
Fig. 11. Conducted EMI emission level.

4. 결 론

본 논문에서는, 400W MHD 램프를 위한 음향 공명이 없는 공진형 전자식 안정기를 제안하고, 실험을 통하여 타당함을 보였다. 반파 브리지 직렬 공진회로와 램프의 부하 특성을 고려하여 전류 제어기를 설계하였고, 음향 공명을 제거하기 위해, 전류 제어기에 진폭 변조를 행하여 스펙트럼 확산 효과를 추가하였다. 반파 브리지 인버터의 구동 주파수 33.5kHz에서 5kHz 대역으로 스펙트럼을 확산시켜, 아크 흔들림이 없는 안정된 점등이 달성되었다. 또한 전원 입력부에 역률 제어기를 채용하여 역률을 향상 시켰고 전류 고조파 함유율을 낮췄다. 코일식 안정기는 안정기 손실 45W를 나타내었으나, 제안된 안정기는 400W 출력에서 안정기손실 22W로 변환 효율 95%를 달성하였고, 전도성 EMI 잡음이 60dBuV 이하로 확인되었다. 또한, 제안된 안정기는 코일식에 비해 저손실, 부피 절감, 경량화 등으로 전력절감 및 설치보수의 비용을 줄일 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] L. Laskai, P. Enjeti and I. J. Pitel, "White-noise modulation of high frequency high intensity discharge lamp ballasts", IAS'94 meeting Reports, pp.1953-1961, 1994
- [2] Jo Olsen and Warren P. Moskowitz, "Time resolved measurements of HID lamp acoustic frequency spectra", IEEE IAS annual meeting, pp.2111-2116, 1998
- [3] J.Zhou, L.Ma and Z.Qian, "A novel method for testing acoustic resonance of HID lamps", APEC'99, pp.480-485, 1999
- [4] Y. J. Liang, K. H. Su and W. H. Fu, "High Frequency Electrical Circuit Model of Metal-Halide Lamp", APEC'98, pp.1163-1167, 1998
- [5] Shmuel Ben-Yaakov and Michael Gulko, Design and performance of an electronic ballast for high-pressure sodium(HPS) lamps, IEEE Tran. on IE Vol. 44, No. 4, pp.486-491, Aug. 1997.
- [6] Richard Redl and Jon D. Paul, "A new high-frequency and high-efficiency electronic ballast for HID lamps: topology,

- analysis, design, and experimental results”, APEC '99, pp.1174-1178, 1999.
- [7] 김기정, 박종연, “메탈할라이드 방전관 내의 음향 공명을 감소시킨 전자식 안정기 설계”, 전력전자학회 논문지 제4권, 제5호, pp.405-412, 1999.
- [8] 이치환, “진폭변조에 의한 메탈할라이드 램프의 음향공명 감소”, 조명전기설비학회논문지 제14권, 제5호, pp.43-49, 2000.
- [9] M.K. Kazimierzuk and D. Czarkowski, Resonant power converters, John Wiley & Sons, Inc., Chap. 6, 1995.
- [10] 이치환, “HID 램프용 전자식 안정기의 설계”, 조명전기설비학회논문지 제13권, 제4호, pp.14-20, 1999.

저 자 소 개



이 성 희 (李 成 熙)
 1967년 9월 7일 생. 1993년 경북대 전자공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1994년~현재 동 포항산업과학연구원 선임연구원.
 Tel : +82-54-279-6724
 Fax : +82-54-279-6599
 E-mail : shlee@rist.re.kr



권 우 현 (權 宇 鉉)
 1953년 6월 22일 생. 1977년 서강대전자공학과 졸업. 1993년 한국과학기술원 졸업(공학박), 1979년~현재 경북대 전자공학과 교수
 Tel : +82-53-950-5526
 Fax : +82-53-952-3262
 E-mail : kwkwon@ee.knu.ac.kr



이 치 환 (李 治 煥)
 1961년 8월 6일 생. 1984년 영남대 전자공학과 졸업. 1994년 경북대 대학원 전자공학과 졸업(공학박). 1991년-1998년 영남이공대 전기과 부교수, 1998년~현재 위덕대 전자공학과 조교수
 Tel : +82-54-760-1613
 Fax : +82-54-760-1506
 E-mail : www.pwm.pe.kr